

Tecnologia ai nastri di partenza

Mariano Severi (*)

Trasmissioni ottiche in applicazioni spaziali: lo standard SpaceFibre estende le capacità del protocollo SpaceWire

Introdotta dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) nel 1999, lo standard SpaceWire ha ormai trovato larga diffusione in ambito spaziale. Esso definisce un protocollo di connessione seriale, sincrono, punto-punto, bidirezionale 'full-duplex', basato sulla codifica 'Data-Strobe' ereditata dallo standard IEEE-1355 e ha un 'data rate' massimo di 200 Mbps.

Grazie a queste caratteristiche, SpaceWire costituisce oggi un'interessante soluzione per la connessione delle apparecchiature di volo nei sistemi di controllo e gestione dati in satelliti di medie dimensioni.

In applicazioni diverse, però, ad esempio nel caso di sensori a elevato data rate, strumenti di 'imaging iperspettrale' o radar SAR ad alta risoluzione, oppure in applicazioni a bordo di lanciatori e della Stazione spaziale, nei sistemi di controllo di terra, si evidenziano alcuni limiti dello standard. Tra questi spiccano, in particolare: la massima frequenza di trasmissione, inferiore a 200 Mbps, limitata dal 'jitter' e dallo

Caratteristiche peculiari del protocollo sono la relativa semplicità d'impiego, misurata, ad esempio, in termini di capacità logica equivalente e quantità di memoria 'embedded' di una tipica implementazione fisica; il supporto per la distribuzione delle informazioni di tempo tra le apparecchiature dello 'spacecraft'; la condivisione di banda tra i canali nelle reti con 'routing' GMR; l'isolamento dei 'fault'.

Per l'impiego in missioni spaziali, il protocollo SpaceFibre deve garantire particolari capacità operative



'skew' dei segnali su lunghe tratte; la massima distanza coperta, inferiore a 10 m, con connessione su cavo in rame; gli ingombri del cablaggio nelle reti più complesse, in quanto il 'link' utilizza quattro doppietti 'twistati', con una massa di circa 87 g/m. A ciò si aggiungono l'impossibilità di avere isolamento galvanico tra i nodi, a causa dell'utilizzo di una tecnologia di segnale che non è bilanciata in c.c., e l'assenza di una modalità di 'power safe' a livello di protocollo. Per queste ragioni, l'ente spaziale ESA ha finanziato a partire dal 2003 un programma di ricerca e sviluppo teso a definire un protocollo di connessione, denominato SpaceFibre, che dovrebbe rappresentare la naturale estensione dello standard SpaceWire. L'obiettivo è realizzare un link punto-punto, bidirezionale, sincrono, full-duplex, in grado di garantire un data rate variabile fino a 10 Gbps, su distanze fino a 100 m e con BER inferiori a 10^{-12} . Il sistema sarà basato su fibra ottica nelle applicazioni a elevato data rate; laddove



Dimostratore di un codec SpaceFibre

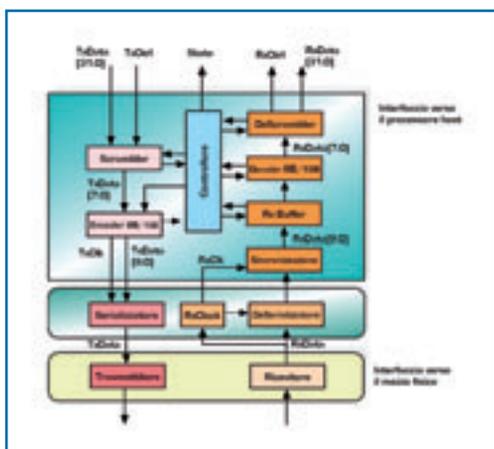
Il codec SpaceFibre

Nello studio per la definizione dei 'layer' fisico e 'data link' dello standard SpaceFibre sono stati presi in considerazione i principali protocolli attualmente presenti sul mercato, tra i quali Gigabit Ethernet, Fibre Channel, PCI Express, Hyper Channel, Serial ATA e Infiniband. Per ognuno di questi sono stati posti in evidenza gli aspetti che meglio si adattano ad applicazioni spaziali.

In particolare, lo strato inferiore di Fibre Channel è stato selezionato come punto di partenza; esso definisce specifici protocolli di sincronizzazione a livello di 'bit' e 'word'; si basa inoltre su una codifica 8B/10B dei dati e utilizza 'insiemi ordinati', ossia sequenze costituite da un codice di controllo di tipo 'comma' e tre caratteri dati. Si ha così un segnale bilanciato in continua, che può essere trasmesso in accoppiamento c.a. e che assicura una sufficiente densità di transizioni di bit, tale da consentire l'utilizzo in ricezione di circuiti PLL per la ricostruzione del 'clock'.

Lo schema di codifica 8B/10B adottato riserva 16 caratteri, che possono servire per il controllo del link a basso a livello; gli insiemi ordinati, poi, possono essere utilizzati per la trasmissione di istruzioni di controllo di flusso e informazioni di tempo. Eventuali differenze nelle frequenze di clock in trasmissione e ricezione possono essere compensate mediante l'implementazione di 'buffer' elastici, che consentano di inserire o rimuovere caratteri di salto per evitare problemi di congestione del link. Inoltre, l'impiego di uno 'scrambler', come nei protocolli PCI Express e Serial ATA, permette di avere uno spettro diffuso, con una riduzione delle emissioni elettromagnetiche nella trasmissione su mezzi in rame.

Altre indicazioni emerse dall'analisi compiuta dall'Università di Dundee riguardano l'adozione di un protocollo di negoziazione della velocità del link, analogamente a quanto specificato per Serial ATA; l'utilizzo dei concetti di 'frame', canali virtuali e classi di traffico propri di PCI Express; l'adozione di una filosofia di routing gruppo-adattativo, ereditata da



Schema di principio di un controllore di nodo SpaceFibre, assumendo che il processore 'host' disponga di un'interfaccia a 32 bit

invece sia richiesto isolamento galvanico, su tradizionali connessioni in rame, con accoppiamento in c.a. sulle distanze più brevi (inferiori a 5 m). Sarà compatibile con i protocolli di comunicazione di più alto livello e con i meccanismi di 'routing' attualmente supportati da SpaceWire, con la possibilità di 'multiplexare' su singolo canale più di una sorgente di dati. I requisiti ambientali per l'utilizzo del protocollo a bordo di missioni tipiche richiedono tolleranza alla radiazione, fino a 100 kRad; resistenza alle vibrazioni di tipo 'random', fino a 25g; resistenza agli 'shock' meccanici, fino a 3.000 g a 10 kHz; operatività nel 'range' di temperature compreso tra -40 e +85 °C; utilizzo di materiali non soggetti a 'outgassing'.

Lo studio ESA ha coinvolto l'Università di Dundee per lo sviluppo del 'codec' SpaceFibre e Patria New Technology, con la collaborazione di VTT, INO, Fibre Pulse e Gore, per la realizzazione del link in fibra ottica e la conduzione dei test ambientali di qualifica.

SpaceWire, piuttosto che di metodi di 'byte striping' su più linee, come nei link Infiniband; infine, l'implementazione di un meccanismo di 'soft-reset', basato sulla ricezione di un carattere di sincronizzazione a un istante non atteso e la gestione delle modalità di 'power-safe' come nel protocollo Serial ATA.

In base a tali indicazioni è stata definita l'architettura di un controllore di nodo SpaceFibre.

Allo stato attuale, l'Università di Dundee ha terminato il progetto Vhdl della macchina a stati di controllo e del circuito di codifica 8B/10B; 'core IP' per la logica di serializzazione/deserializzazione sono resi disponibili da terze parti per l'implementazione in Asic. Un primo prototipo è stato realizzato in Fpga Virtex-4, utilizzando i transceiver Rocket-IO embedded o circuiti SerDes esterni; il dispositivo TLK2711 HFG prodotto da Texas, in particolare, è disponibile in versione QML classe V qualificata per applicazioni spaziali. Successivamente, è stato realizzato un 'bridge' SpaceFibre/SpaceWire per dimostrare l'interoperabilità dei due standard.



Il link in fibra ottica

La connessione in fibra ottica

Per quanto concerne il link in fibra ottica proposto per lo standard SpaceFibre, il transceiver è stato progettato dal Centro di Ricerca finlandese VTT; utilizza un laser Vcsel a 850 nm, tecnologia caratterizzata da bassa dissipazione di potenza, discreta resistenza alla radiazione e scarsa dipendenza dei parametri di lavoro dalle variazioni di temperatura, e diodi PIN in composti GaAs, del tipo comunemente utilizzato nei fotorivelatori per trasmissione ottiche su brevi distanze.

Alcuni test di laboratorio hanno dimostrato una discreta qualità del diagramma a occhio in uscita al ricevitore fino a 6 Gbps, un 'bit-error rate' che, a 2 Gbps, si può stimare sia inferiore a $1,3 \times 10^{-14}$ con confidenza del 99 per cento e un margine nella potenza ottica del link di almeno 15 dB. Non è stato inoltre osservato alcun degrado delle prestazioni nei componenti sottoposti a test a vibrazione, shock termico e meccanico. Occorrerà a breve eseguire altri test a radiazione, ma le prime sommarie indicazioni ricavate anche da esperienze passate sembrano decisamente promettenti.

La fibra ottica è stata selezionata dall'Istituto Nazionale di

Ottica canadese INO: è di tipo multimodale 'graded-index', unica soluzione in grado di soddisfare i requisiti dello standard SpaceFibre in termini di data rate sostenuto, accoppiamento ottico e tolleranza alle radiazioni. Sono stati sottoposti ai test di qualifica anche diversi tipi di fibre Cots, che hanno però mostrato perdite nell'attenuazione di linea comprese tra 7 e 16 dB, quando soggetti a radiazione ionizzante con dose totale 100 kRad. Le fibre selezionate sono della serie MaxCap300 prodotte da Draka Comteq.

L'assemblaggio del cavo in fibra ottica è stato studiato da Gore, azienda specializzata nella realizzazione di cablaggi in ambito aerospaziale. Per questo aspetto, il problema principale è legato alle ampie escursioni di temperatura tipiche delle applicazioni aerospaziali, per cui è lecito attendersi nelle fibre fenomeni di 'micro-bending' indotto termicamente. La soluzione proposta da Gore prevede che il cavo SpaceFibre sia assemblato utilizzando uno strato di politetrafluoroetilene espanso, depositato subito dopo il rivestimento interno della fibra, in modo da mitigare gli effetti legati ai diversi coefficienti di dilatazione termica del 'core' e degli strati più esterni.

I connettori per le fibre selezionati sono di tipo Avim, forniti da Diamond, già utilizzati con successo in diverse precedenti missioni. Sono caratterizzati da un profilo basso e compatto, eccellenti prestazioni con perdite d'inserzione inferiori a 0,2 dB, capacità di operare con fibre monomodali e multimodali; non utilizzano materiali soggetti a outgassing e includono un meccanismo unico nel loro genere, che assicura estrema resistenza alle vibrazioni di tipo meccanico.

Un prototipo dimostrativo

SpaceFibre è il nuovo standard di connessione proposto dall'Agenzia Spaziale Europea come estensione del protocollo SpaceWire, largamente adottato nella maggior parte delle missioni internazionali. Pur restando compatibile con questo ad alto livello, SpaceFibre estende la capacità di trasmissione dati fino a 10 Gbps, su distanze fino a 100 m, utilizzando una connessione in fibra ottica e adottando una codifica 8B/10B dei dati.

Sono stati completati con successo diversi studi di fattibilità, che hanno dimostrato la disponibilità di tecnologie del settore adeguate ad applicazioni spaziali, dove i requisiti ambientali diventano piuttosto stringenti. È stato già assemblato un prototipo a scopo dimostrativo, che potrà anche essere utilizzato come 'test bed' per sviluppi futuri. A breve lo standard sarà sottoposto, in versione 'draft', all'ESA per la discussione all'interno dei diversi gruppi di lavoro e la successiva pubblicazione. ■

(*) Riferimenti: Ecss-E-50-12A "SpaceWire, links, nodes, routers and networks" Issue 1 - European Cooperation for Space Data Standardization, Febbraio 2003; M.Suess "Future Focus: SpaceFibre" - Mapld International Conference 2006, Washington DC, 26-28 Settembre 2006; S. Parkes et alii "SpaceFibre" - International SpaceWire Conference 2007, Dundee (Scozia), 17-19 Settembre 2007